

Optimasi Ukuran Teras Reaktor Cepat Berpendingin Gas dengan Uranium Alam sebagai Bahan Bakar

Dora Andris*, Dian Fitriyani, Feriska Handayani Irka

Jurusan Fisika Universitas Andalas

*doraandris18.93@gmail.com

ABSTRAK

Optimasi ukuran teras reaktor cepat berpendingin gas dengan uranium alam sebagai bahan bakar telah dilakukan. Optimasi ukuran teras dilakukan untuk model teras silinder dua dimensi R-Z pada volume 8 m^3 , 14 m^3 dan 20 m^3 . Setiap volume dibuat lima model ukuran teras dengan bervariasi tinggi dan diameter teras. Diameter teras untuk setiap model ukuran teras dibagi menjadi 10 *region*. Perhitungan dilakukan dengan simulasi komputasi dengan program SRAC. Reaktor ini menggunakan strategi *shuffling* arah radial agar reaktor dapat beroperasi dengan bahan bakar uranium alam. Setelah 10 tahun periode *burn up*, bahan bakar di-*shuffling* secara radial dari *region* 1 ke *region* 2, *region* 2 ke *region* 3, begitu seterusnya sampai bahan bakar di *region* 9 di-*shuffling* ke *region* 10 sehingga bahan bakar *region* 10 dikeluarkan dari teras reaktor dan bahan bakar baru ditempatkan di *region* 1. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk teras dengan volume 8 m^3 dan 14 m^3 diperoleh nilai k_{eff} antara 0,95 sampai 1,05 (reaktor berada dalam keadaan kritis) dan untuk volume 20 m^3 $k_{\text{eff}} > 1,05$ (keadaan superkritis) dengan ayunan reaktivitas $\pm 0,05$. Teras dengan model paling pipih pada volume 8 m^3 merupakan model yang direkomendasikan untuk desain reaktor karena menghasilkan kinerja neutronik reaktor yang optimal dibandingkan model lain.

Kata kunci: ukuran teras reaktor, uranium alam, SRAC, strategi *shuffling*

ABSTRACT

The optimization of core size gas cooled fast reactor with natural uranium fuel has been done. It was applied to core model cylinder two dimensions R-Z on volume 8 m^3 , 14 m^3 and 20 m^3 . Each volume was made to five core size models with variation of height and core diameter. For each model, core diameter was divided into 10 regions. Calculation was conducted by simulation of computation with SRAC program. This reactor was used shuffling strategy in radial direction in order to make reactor operated with input natural uranium fuel. After 10 years burn up period, fuel from first region was radially shuffled to second region, from second region to third region and so on until fuel from 9th region shuffled to 10th region, and then fuel from 10th region was carried out from reactor core and fresh uranium input to the first region. The result of calculation show that for core with volume 8 m^3 and 14 m^3 , k_{eff} value between 0.95 until 1.05 (reached critical situation), while on volume 20 m^3 $k_{\text{eff}} > 1.05$ (achieved supercritical situation) with reactivity swing ± 0.05 . Core with most thin model on volume 8 m^3 is recommended for reactor design because it's the most produce optimal core of reactor than others.

Keywords: reactor core size, natural uranium, SRAC, shuffling strategy

I. PENDAHULUAN

Energi berbasis bahan fosil merupakan sumber energi utama yang digunakan penduduk dunia hingga saat ini. Bahan fosil seperti minyak dan gas bumi merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui sehingga ketersediaannya semakin berkurang karena penggunaan energi terus meningkat seiring pesatnya kemajuan teknologi. Untuk menanggulangi kondisi tersebut, dibutuhkan sumber energi alternatif yang cukup memadai untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat, salah satunya energi nuklir. Energi nuklir dapat diperoleh dari reaksi fisi pada sebuah reaktor. Untuk melakukan reaksi fisi dibutuhkan bahan fisi yaitu bahan yang mudah berfisi seperti U-233 dan U-235 yang hanya terdapat 0,72% di alam dan 99,28% merupakan bahan fertil.

Bahan fertil merupakan bahan yang berpotensi untuk diubah menjadi bahan fisi dengan tangkapan neutron cepat berenergi sekitar 1 MeV. Reaktor generasi IV merupakan reaktor yang sedang dikembangkan oleh para ilmuwan yang dapat memenuhi kondisi tangkapan neutron cepat tersebut. *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) merupakan salah satu jenis reaktor generasi IV. Reaktor ini memanfaatkan spektrum cepat dari neutron untuk mengubah bahan fertil menjadi fisi dan menggunakan pendingin berupa helium (He). Keunggulan dari penggunaan helium adalah dapat beroperasi pada suhu yang tinggi sekitar 850°C sebagai pendukung produktivitas gas hidrogen dan terbaik dalam hal ketahanan karena mempunyai siklus bahan

bakar tertutup. Pengembangan desain GCFR telah banyak dilakukan, salah satunya dengan memanfaatkan uranium alam sebagai bahan bakar menggunakan strategi *shuffling* arah radial (Irka, 2011). Keuntungan penggunaan uranium alam sebagai bahan bakar dikarenakan uranium alam tidak perlu diperkaya sehingga lebih ekonomis (Yanti, 2009).

Desain GCFR berpendingin gas helium masih terus dikembangkan agar dapat memenuhi tujuan utamanya. Berbagai komponen pada desain GCFR masih perlu dilakukan optimasi. Pengoptimalan desain reaktor sangatlah kompleks sehingga perlu dilakukan pendekatan, salah satunya melalui simulasi komputasi. Pada penelitian ini dilakukan simulasi dalam pengoptimalan ukuran teras reaktor berbentuk silinder pada GCFR. Geometri silinder sampai saat ini merupakan bentuk yang paling optimal jika ditinjau dari faktor kebocoran neutron dan aliran pendingin (Drajat, 2011). Ukuran tinggi dan diameter teras reaktor berpengaruh terhadap reaktivitas teras. Semakin tinggi ukuran teras maka semakin besar reaktivitas terasnya (Utami, 2013). Untuk itu, perlu dilakukan kombinasi ukuran diameter dan tinggi teras yang tepat sehingga dapat menghasilkan perbandingan ukuran diameter dan tinggi teras yang optimal. Pengoptimalan ini ditinjau dari aspek neutronik di dalam teras reaktor yang meliputi faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) dan faktor multiplikasi infinitif (k_{inf}).

Analisis neutronik adalah pembahasan mengenai populasi neutron, fluks neutron, distribusi neutron dan hal-hal yang berhubungan dengan perilaku neutron dalam teras reaktor. Di dalam teras reaktor terjadi reaksi fisi secara berantai. Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat yang bersifat fisil seperti U-235 atau Pu-239 menjadi inti yang lebih ringan massanya yang disertai dengan pelepasan energi. Setiap reaksi fisi menghasilkan energi yang besarnya sekitar 200 MeV. Reaksi fisi sulit terjadi secara spontan. Reaksi fisi terjadi bila inti berat ditumbuk oleh sebuah neutron. Partikel neutron yang telah menumbuk inti berat seperti U-235 atau Pu-239 akan memproduksi (2-3) neutron yang baru. Neutron ini dapat menumbuk kembali inti berat seperti U-235 atau Pu-239 untuk membentuk reaksi fisi berikutnya. Reaksi ini dikendalikan dalam sebuah reaktor, karena neutron yang ditangkap adalah neutron cepat maka reaktor yang digunakan juga reaktor cepat.

Pada reaktor cepat dimungkinkan menggunakan bahan fertil dari uranium alam secara lebih efektif. Neutron yang dihasilkan dari reaktor cepat bereaksi dengan bahan fertil (U-238) untuk menghasilkan bahan fisil baru (Pu-239) (Haryani, 2013). Di dalam reaktor nuklir, neutron bergerak secara difusi sehingga dalam analisis dibutuhkan persamaan difusi multigrup yang ditunjukkan pada Persamaan 1 (Duderstadt dan Hamilton, 1976):

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} - \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g + \sum_{t_g} \phi_g(r, t) = \sum_{g=1}^G \sum_{s_g} \phi_g + \chi_g \sum_{g=1}^G v_g \cdot \sum_{t_g} \phi_g + S_g \quad (1)$$

Secara matematis, faktor multiplikasi efektif ditunjukkan pada Persamaan 2:

$$k = \frac{\text{jumlah neutron pada satu generasi}}{\text{jumlah neutron pada generasi sebelumnya}} \quad (2)$$

Nilai faktor multiplikasi infinitif dapat dicari menggunakan Persamaan 3:

$$k_{\infty} = \eta f \quad (3)$$

dimana η adalah jumlah neutron fisi yang dihasilkan per jumlah neutron yang diserap dan f adalah probabilitas bersyarat bila neutron terserap, maka neutron akan di serap ke dalam bahan bakar.

II. METODE

Perancangan GCFR ini dilakukan melalui simulasi komputasi kode SRAC yang dikembangkan oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*). Strategi *shuffling* yang digunakan dalam penelitian ini bertujuan untuk mengoperasikan reaktor menggunakan bahan bakar uranium alam. Uranium alam yang akan digunakan untuk bahan bakar reaktor terlebih dahulu dibakar dalam jangka waktu tertentu sehingga menghasilkan bahan bakar fisil yang dapat berfisi di dalam reaktor.

2.1 Spesifikasi Umum Desain Reaktor

Spesifikasi umum desain reaktor yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Pada penelitian ini, parameter yang divariasikan adalah volume, tinggi dan diameter teras dimana volume yang digunakan terdiri dari 3 ukuran. Ukuran tinggi dan diameter teras dilakukan sebanyak 5 variasi untuk masing-masing volume teras. Berdasarkan variasi ini akan dihasilkan 5 model ukuran teras yang dimulai dari model teras tinggi sampai model teras pipih seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1 Spesifikasi umum desain reaktor

Parameter	Deskripsi
Daya (MWth)	550
Tipe <i>pin cell</i>	<i>Cylinder cell</i>
Geometri teras	2-D <i>Cylinder</i>
Jumlah <i>region</i> bervolume sama dalam arah radial	10 <i>region</i>
Periode <i>refueling</i>	10 tahun
Bahan bakar (<i>fuel</i>)	UN dan PuN
Struktur (<i>cladding</i>)	SS316
Pendingin (<i>coolant</i>)	Helium
Fraksi bahan bakar	65%
Fraksi struktur	10%
Fraksi pendingin	25%
Diameter <i>pin/pitch</i>	1,4 cm
Lebar reflektor	50 cm

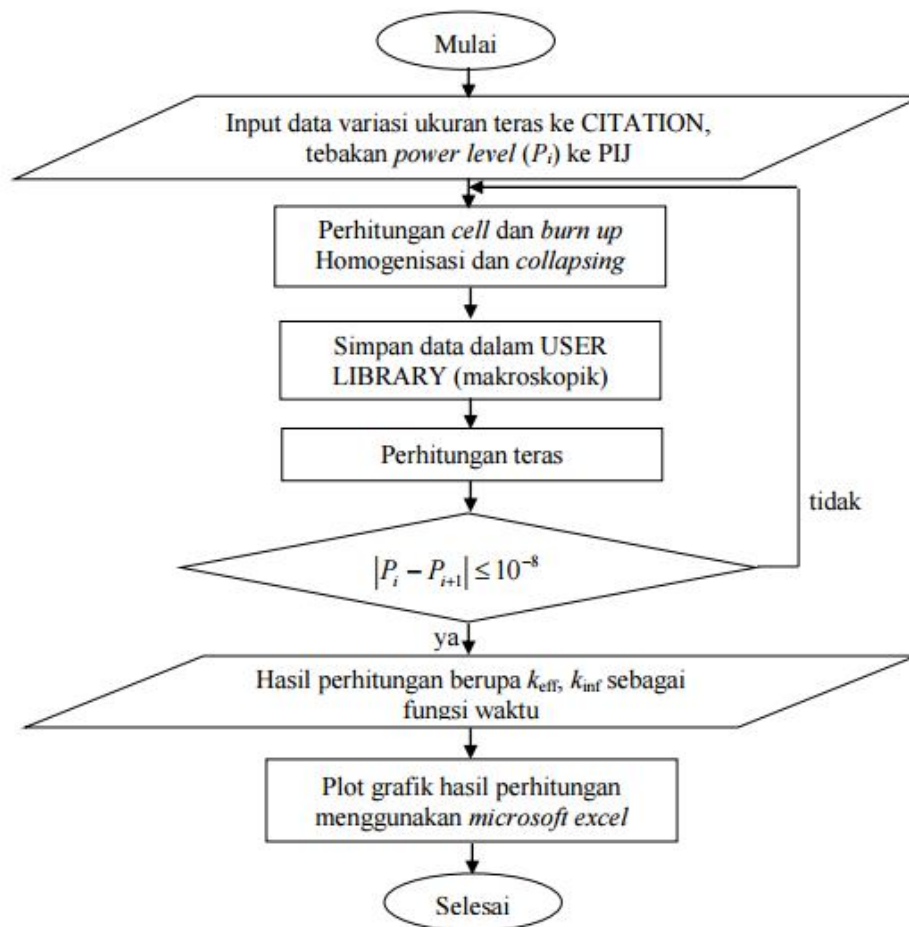
Tabel 2 Variasi ukuran teras aktif reaktor

Model ukuran teras	Volume teras (m ³)	Diameter (cm)	Tinggi (cm)
1a	8	191,8764	276,8071
1b		203,2036	246,8071
1c		216,8071	216,8071
1d		246,8071	167,3035
1e		276,8071	133,0043
2a	14	235,6109	321,2680
2b		247,4474	291,2680
2c		261,2680	261,2680
2d		291,2680	210,2194
2e		321,2680	172,7919
3a	20	268,1784	354,2525
3b		280,3100	324,2525
3c		294,2525	294,2525
3d		324,2525	242,3225
3e		354,2525	203,0180

Variasi diameter dan tinggi teras yang digunakan pada Tabel 2 merupakan variasi yang mempertahankan volume. Lima variasi tersebut dilakukan dengan cara membuat ukuran tinggi dan diameter teras sama untuk volume yang tetap. Selanjutnya ditambahkan kelipatan 30 cm untuk 2 variasi diameter dan 2 variasi tinggi teras. Hasil dari variasi nantinya berjumlah 5 variasi untuk 1 volume.

2.2 Prosedur Perhitungan Menggunakan SRAC

Data nuklir yang digunakan pada penelitian ini adalah data nuklida dari JENDL-3.2, SRAC melakukan perhitungan dan menghasilkan data penampang lintang makroskopik dari masing-masing material teras reaktor. Data makroskopik akan digunakan untuk perhitungan teras reaktor yang menghasilkan banyak parameter. Untuk penelitian parameter yang dianalisis adalah faktor multiplikasi efektif dan faktor multiplikasi infinitif. Untuk diagram alir perhitungan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram alir perhitungan menggunakan SRAC

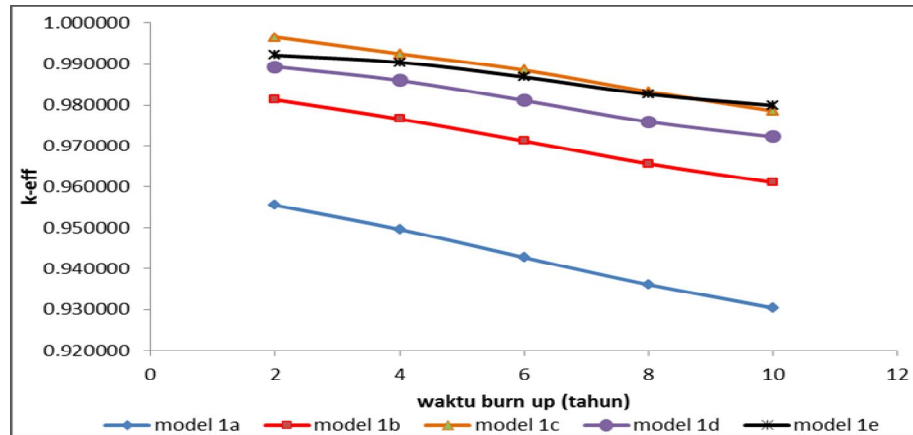
III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Faktor Multiplikasi Efektif (k_{eff})

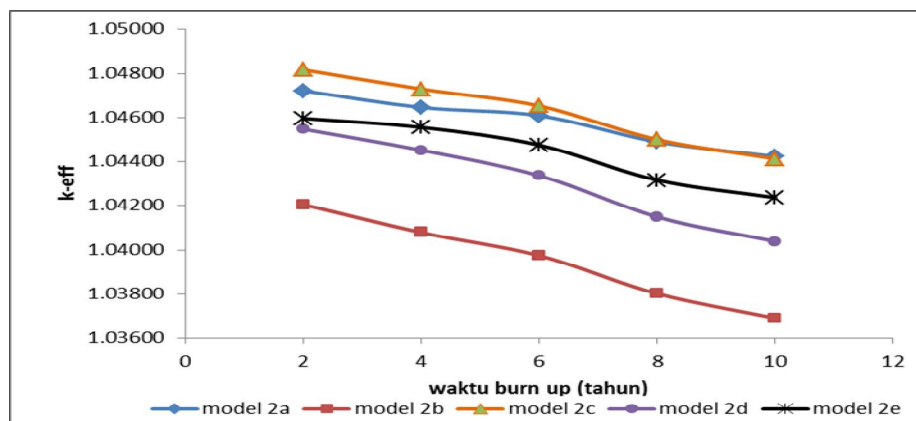
Untuk memperoleh kondisi reaktor dalam keadaan kritis ($k_{eff} \approx 1$) pada penelitian ini dilakukan variasi diameter dan tinggi teras untuk setiap volume teras yang digunakan. Nilai k_{eff} untuk seluruh model ukuran teras ditunjukkan pada Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4. Nilai k_{eff} untuk semua model ukuran teras masih berada dalam interval kekritisan reaktor ($k_{eff} = 0,95-1,05$) selama 10 tahun periode *burn up* kecuali model ukuran teras pada volume 20 m^3 berada pada kondisi superkritis.

Nilai k_{eff} yang terbaik untuk semua model ukuran teras pada masing-masing volume adalah model teras dengan diameter yang lebih besar (1e dan 2e) kecuali pada volume 20 m^3 . Pada volume 20 m^3 model terbaik adalah model ukuran teras dengan diameter yang lebih kecil (3a) dibandingkan model lain karena volume 20 m^3 menghasilkan kondisi superkritis. Hal ini sejalan dengan strategi *shuffling* arah radial yang digunakan sehingga semakin besar diameter teras maka ukuran meshnya semakin besar dan mempertinggi reaktivitas neutron dalam teras reaktor. Kondisi ini menyebabkan nilai k_{eff} semakin besar pada volume yang lebih besar sehingga mencapai kondisi superkritis.

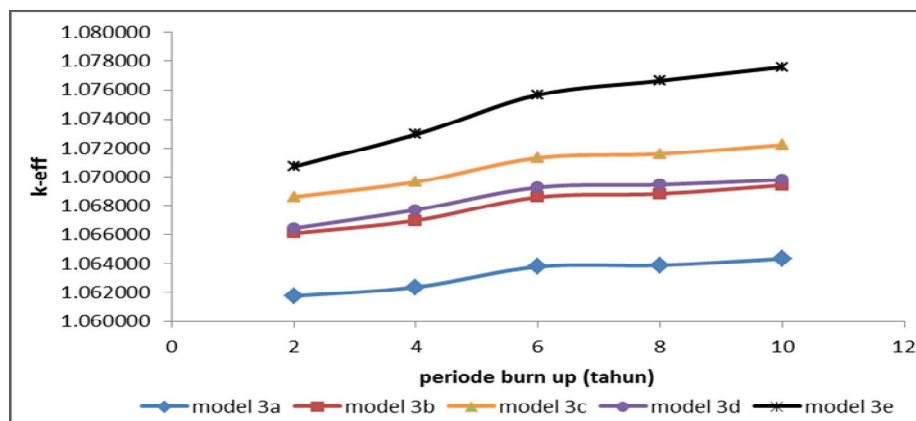
Untuk variasi diameter dan tinggi teras yang menghasilkan kinerja reaktor yang optimal dari semua model ukuran teras adalah model 1e (volume 8 m^3), terlihat dari nilai k_{eff} yang berada dalam kondisi kritis dan dapat mempertahankan kekritisan pada teras reaktor selama 10 tahun periode *burn up*.



Gambar 2 Hubungan k_{eff} dengan periode *burn up* untuk volume 8 m³



Gambar 3 Hubungan k_{eff} dengan periode *burn up* untuk volume 14 m³



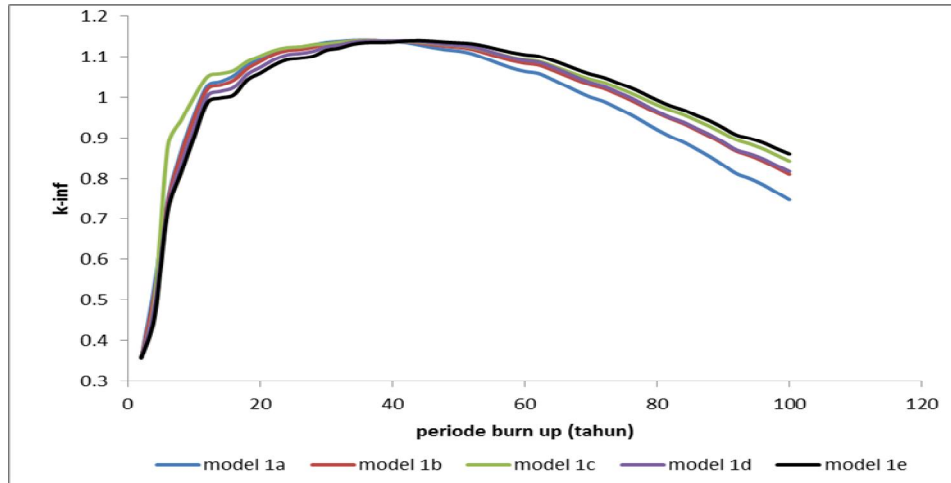
Gambar 4 Hubungan k_{eff} dengan periode *burn up* untuk volume 20 m³

3.2 Faktor Multiplikasi Infinitif (k_{inf})

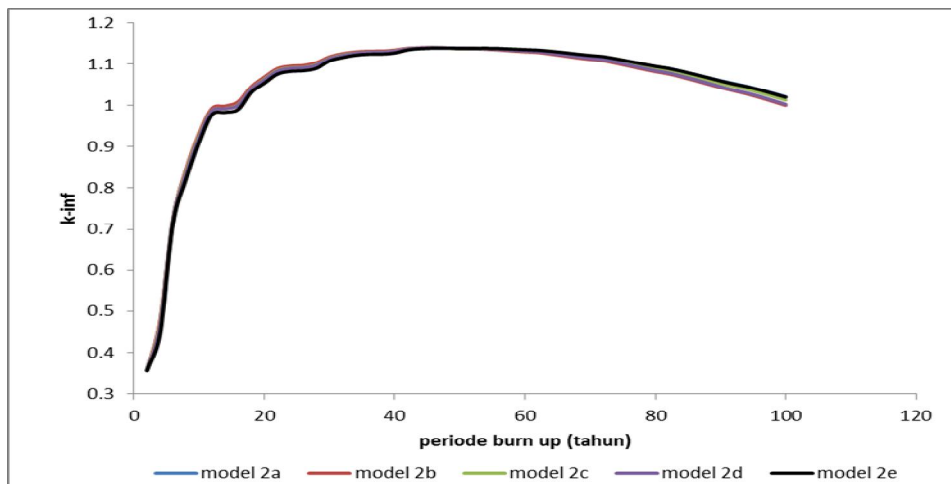
Faktor multiplikasi infinitif (k_{inf}) merupakan nilai faktor multiplikasi takhingga, dimana nilai ini didapatkan dengan mengasumsikan ukuran *pin* bahan bakar takhingga. Faktor multiplikasi infinitif untuk ketiga volume teras yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7. Nilai k_{inf} pada semua model ukuran teras untuk setiap volume teras dalam 10 tahun pertama periode *burn up* masih kecil. Hal ini dikarenakan jumlah Pu-239 pada awal periode *burn up* masih sedikit sehingga neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi hanya bersumber dari bahan fisil U-235.

Pengaruh model ukuran teras terhadap k_{inf} sebanding dengan besarnya diameter teras yang digunakan. Semakin besar diameter teras yang digunakan, maka semakin besar kemungkinan terjadinya reaksi neutron dengan bahan bakar di dalam teras. Kondisi ini sejalan

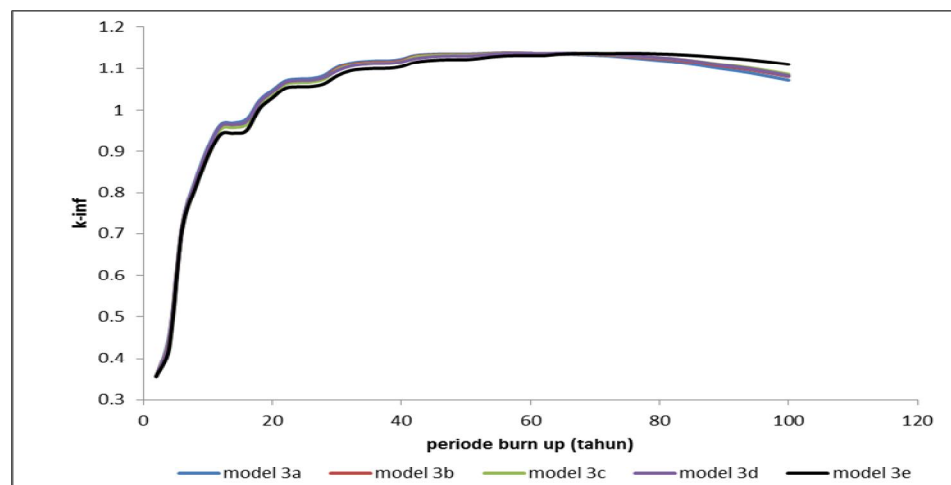
dengan pembagian *region* arah radial yang digunakan. Dalam pembagian mesh, setiap *region* dibagi menjadi 2 mesh sedangkan setiap diameter teras dibagi menjadi 10 *region* dengan volume yang sama. Hasilnya semakin besar diameter yang digunakan, mengakibatkan ukuran meshnya semakin besar dan mempertinggi reaktivitas neutron di dalam teras reaktor.



Gambar 5 Hubungan k_{inf} dengan *burn up* untuk volume 8 m³



Gambar 6 Hubungan k_{inf} dengan *burn up* untuk volume 14 m³



Gambar 7 Hubungan k_{inf} dengan *burn up* untuk volume 20 m³

IV. KESIMPULAN

Setelah melakukan perancangan, perhitungan dan analisa dari hasil yang diperoleh, dapat diambil kesimpulan bahwa nilai k_{eff} untuk volume 8 m³ dan 14 m³ berada dalam kondisi kritis sedangkan untuk volume 20 m³ sudah melewati keadaan kritis. Untuk perbandingan diameter dan tinggi teras yang paling baik digunakan dalam perancangan reaktor cepat GCFR pada penelitian ini adalah model teras paling pipih (1e) pada volume 8 m³.

DAFTAR PUSTAKA

- Drajat, R.Z., "Analisis Termalhidrolik *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR)", Skripsi S1, Institut Teknologi Bandung, 2011.
- Duderstadt, J.J. dan Hamilton, L.J., 1976, *Nuclear Reactor Analysis* (John Wiley & Sons, Inc., Canada), hal. 288-290.
- Haryani, N., 2013, Pengaruh Variasi Bahan Pendingin Jenis Logam Cair Terhadap Kinerja Termalhidrolik Pada Reaktor Cepat, *Jurnal Fisika Unand*, Vol 2, No.3, Jurusan Fisika FMIPA Unand, hal 190-194.
- Irka, F.H., "Studi Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas Dengan Bahan Bakar Uranium Alam Menggunakan Strategi Shuffling Arah Radial", Tesis S2, Institut Teknologi Bandung, 2011.
- Utami, R. dan Yulianti, Y., 2013, Desain Raktor Air Superkritis (*Super Critical Water Reactor*) Dengan Bahan Bakar Thorium, *Jurnal Ilmu Dasar*, Vol 14, No.1, Universitas Lampung, hal 1-6.
- Yanti, M., "Studi Desain *Gas Cooled Fast Reactor* yang Berpendingin Helium dan Menggunakan Uranium Alam sebagai Bahan Bakar", Skripsi S1, Institut Teknologi Bandung, 2009.